



普通高等教育“十二五”规划教材



卓越工程师系列教材

数字电子与EDA技术

秦进平 主 编

刘海成 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划

卓越工程师系列教材

数字电子与EDA技术

主 编 秦进平

副主编 刘海成

编 写 周正林 张凌志 马 成 高旭东

主 审 阳昌汉



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书以数字电子技术基本理论和基本技能为引导,以 EDA 平台和硬件描述语言为主要设计手段,以全面提升学生的课程应用能力为宗旨,将传统的数字电子技术课程和 EDA 技术课程深度融合,建立传统数字电子技术设计和现代设计方法设计相结合的新课程体系。在电子系统设计中,突出现代设计方法设计;在传统设计中,有效地利用 EDA 工具加强教学。

本书可作为普通高等院校电子信息工程、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、通信工程、电子科学与技术、自动化、计算机科学与技术等专业数字电子技术、数字逻辑或 EDA 技术课程的教材或参考书,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子与 EDA 技术/秦进平主编. —北京:中国电力出版社, 2013.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4525 - 6

I. ①数… II. ①秦… III. ①数字电路—电路设计—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 116803 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 466 千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

现代电子和通信技术以及计算机技术的发展,归根结底是数字电子技术的发展。作为信息社会的技术基础,数字电子技术作为电子信息工程、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、通信工程、自动化、计算机科学与技术等专业必修的基础课已经几十年。传统的《数字电子技术》课程以逻辑代数的公式和定理、逻辑函数的表示方法,以及逻辑函数的简化方法作为分析与设计数字逻辑电路的数学工具,且将卡诺图作为数字逻辑电路设计中的核心工具。当进行数字逻辑系统设计时,首先要根据逻辑功能画出卡诺图,并最终得到一张线路图,这就是传统的原理图设计方法。为了能够对设计进行验证,设计者通常还要通过搭建硬件电路板,对设计进行验证,效率低下。随着电子设计自动化的出现,卡诺图的历史使命已经结束,数字逻辑电路设计的集成度、复杂度越来越高,传统的数字系统设计方法已满足不了设计的要求。同时,在传统的数字系统设计中,学生在没有逻辑分析仪等仪器的环境下,很难直观经历和感受数字系统分析与调试的过程。很多学生一直处在数字系统设计的初等水平,甚至对数字电路的设计仅仅是“纸上谈兵”,学生自然对这门课的实验毫无兴趣。

另外,以可编程器件为基础的数字系统设计早已成为工程应用的主流,所采用的方法也并非传统的卡诺图,而是采用硬件描述语言等。为了能够提升学生进行数字系统设计的能力,与工程应用接轨,EDA 技术课程作为数字电子技术的延伸和实训环节早已进入大学的课堂。那么什么是电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)技术呢?

EDA 技术就是以大规模可编程逻辑器件为设计载体,以硬件描述语言为系统逻辑描述的主要表达方式,以计算机、EDA 环境及实验开发系统为设计工具,自动完成用软件方式描述的电子系统到硬件系统的逻辑编译、逻辑化简、逻辑分割、逻辑综合及优化、布局布线、逻辑仿真,直至完成对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射、编程下载等工作,最终形成集成电子系统或 ASIC 的一门多学科融合的综合性的技术。

然而,在多年的实践中,数字电子技术与 EDA 技术这两门课程的教学并没有达到预想的效果,对其原因分析如下。

(1) EDA 技术课程一般在第 6 或第 7 学期,相对于数字电子技术课程,两门课程之间有空挡,造成学习的不连贯。尤其是两门课程的教学相对孤立,不能做到有机融合,学生不能完全做到互促式学习,形成扎实的技能。

(2) 数字电子技术课程具有较多的学时,甚至具有较多的实践学时和集中实践环节;而 EDA 技术课程最多也不过 32 学时,更没有集中实践环节,相对于目前的工程实践,本末倒置。

(3) 相对于 EDA 技术课程,数字电子技术课程没有方便的实践环境。EDA 技术课程可以在 EDA 平台上进行各种实验,学生也可方便地在个人计算机上实验;而数字电子技术课程大多是按学校安排进行一些验证性实验而已,学生在学习数字电子技术课程时主动性差。

因此,本书将传统的数字电子技术与 EDA 技术整合到一门课程,统筹安排教学内容、合理整合教学资源,使得学生能将数字系统设计的原理与实践紧密结合起来。由于数字系统

设计相关课程是电类专业后续多门课程的基础,因此,加大对该课程理论和实践环节的改革和建设力度,对于快速提高学生的专业能力具有格外重要的意义。同时,课程整合后,集中实践环节更具工程内涵,为学生的快速成才提供捷径。

鉴于以上考虑,作者在多年教学实践基础上编写本书。本书以数字电子基本理论和基本技能为引导,以 EDA 平台和硬件描述语言为主要设计手段,以培养工程能力为宗旨;逻辑电平由早已过时的 5V 改为 3.3V 描述,淡化电路的内部结构,强调电路的外部特性;淡化逻辑表达式的化简,由数字电子基本知识快速过渡到以 EDA 技术为核心的数字系统设计方法上来。本书将数字电子技术课程和 EDA 技术课程深度融合,建立传统数字电子技术设计和现代设计方法设计相结合的新课程体系,而非简单拼凑:在原理图设计层面,通过 EDA 环境讲述数字逻辑基础;在可编程逻辑器件层面,基于硬件描述语言讲述数字系统设计,即在电子系统设计中,突出现代设计方法设计;在传统设计中,有效地利用 EDA 工具加强教学。同时,本书以注重基本概念、基本单元电路、基本方法和典型电路为出发点,促进学生基本应用能力的形成。

在数字电子技术的教学过程中引入 EDA 技术,不仅可以使学生形象、直观地理解电路的相关原理和工作过程,还可以通过修改电路的形式或参数,与学生一起讨论电路中出现的各种现象,找出解决问题的方法。这样不仅可以活跃课堂气氛,还可以提高学生学习兴趣。学生反映易学、新颖、有趣,同时,理论和实验的结合紧密可充分发挥学生的积极性和创造性,达到了较好的教学效果。

本书由秦进平教授主编并统稿,刘海成担任副主编。秦进平编写第 1 章、第 3 章和第 7 章,刘海成编写第 4 章和第 6 章,周正林编写第 8 章,张凌志编写第 9 章和附录,马成编写第 2 章,高旭东编写第 5 章。全书由阳昌汉教授主审,提出了很多宝贵意见,在此表示由衷的感谢。

作者虽然力求完美,但由于水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者不吝指正和赐教。

作 者

2013 年 3 月



目 录

前言

第1章 数字电子系统分析与设计基础	1
1.1 数字信号与数字电路	1
1.1.1 模拟信号与数字信号	1
1.1.2 数字电路与模拟电路的区别及联系	1
1.2 数制及转换	2
1.2.1 十进制	3
1.2.2 二进制	3
1.2.3 十六进制	3
1.2.4 不同进制之间的相互转换	3
1.3 逻辑运算与逻辑代数	6
1.3.1 逻辑运算及其表示方法	6
1.3.2 逻辑代数的定理及定律	13
1.3.3 逻辑函数式的代数法化简	14
1.4 逻辑函数的卡诺图化简	15
1.4.1 逻辑函数的最小项表达式	15
1.4.2 用卡诺图化简逻辑函数	16
1.5 二进制数的算术运算	19
1.5.1 无符号二进制数的算术运算	19
1.5.2 有符号二进制数的表示及加减法运算	19
1.6 二进制编码	22
1.6.1 二-十进制码	22
1.6.2 格雷码	23
1.6.3 ASCII 码	24
1.7 数字系统设计与EDA技术概述	25
1.7.1 数字系统设计与设计方法的发展	25
1.7.2 EDA技术的含义及主要内容	27
习题与思考题	29
第2章 逻辑门电路	32
2.1 基于二极管和三极管的简单逻辑门电路	32
2.1.1 二极管与门和二极管或门电路	32
2.1.2 三极管非门电路	33
2.2 TTL逻辑门电路	33
2.2.1 基本TTL与非门的工作原理	33

2.2.2	TTL 与非门的技术参数	35
2.2.3	标准 TTL 集成逻辑门的改进系列参数及对比	39
2.3	MOS 管逻辑门电路	41
2.3.1	MOS 管及其开关特性	42
2.3.2	CMOS 反相器	42
2.3.3	MOS 管与非门电路和 MOS 管或非门电路	45
2.3.4	CMOS 集成逻辑门的种类及参数	46
2.4	三态门及应用	47
2.4.1	三态门的结构及工作原理	47
2.4.2	三态门的应用	48
2.5	OC 门、OD 门及应用	49
2.5.1	OC 门的电路结构	50
2.5.2	OD 门的电路结构	51
2.6	逻辑电平接口转换及抗干扰设计	52
2.6.1	数字逻辑电平	52
2.6.2	OC 门和 OD 门的电平转换应用	53
2.6.3	TTL 逻辑门与 CMOS 逻辑门接口	53
2.6.4	逻辑门电路的抗干扰措施	54
	习题与思考题	55
第 3 章	组合逻辑电路分析与设计	58
3.1	组合逻辑电路的分析	58
3.2	组合逻辑电路的设计	59
3.2.1	单输出组合电路的设计	59
3.2.2	多输出组合电路的设计	61
3.3	组合逻辑电路中的竞争冒险	62
3.3.1	产生竞争冒险的原因及判断	62
3.3.2	消去竞争冒险的方法	63
3.3.3	卡诺图在组合逻辑电路竞争冒险中的应用	64
3.4	Quartus II 的原理图 EDA 设计环境	65
3.4.1	Quartus II 简介	65
3.4.2	原理图编辑输入	66
3.4.3	编译	71
3.4.4	时序功能仿真	71
3.4.5	Quartus II 环境下的引脚配置及芯片烧写	74
3.5	编码器与译码器	78
3.5.1	编码器	78
3.5.2	译码器	80
3.6	数据选择器与数据分配器	85
3.6.1	数据选择器的功能及工作原理	85

3.6.2 常用集成数据选择器及应用	86
3.6.3 数据分配器	89
3.7 数值比较器	90
3.7.1 数值比较器的工作原理	90
3.7.2 集成数值比较器	91
3.8 算术运算电路	92
3.8.1 加法运算电路	92
3.8.2 减法运算电路	96
习题与思考题	97
第4章 时序逻辑电路基础	99
4.1 双稳态存储器	99
4.1.1 双稳态电路	99
4.1.2 基本 RS 存储器	99
4.2 锁存器	101
4.2.1 RS 锁存器	101
4.2.2 带有异步和使能控制的 RS 锁存器	102
4.2.3 D 锁存器及应用	103
4.3 触发器	104
4.3.1 D 触发器及应用	105
4.3.2 JK 触发器	108
4.3.3 触发器的工作参数	109
4.3.4 不同类型触发器之间的转换	109
4.4 时序逻辑电路	110
4.4.1 时序逻辑电路及分析	110
4.4.2 时序逻辑电路的设计	117
4.5 计数器	124
4.5.1 计数器的一般设计方法	125
4.5.2 集成计数器 74HC161 及应用	126
4.6 寄存器和移位寄存器	129
4.6.1 寄存器	129
4.6.2 移位寄存器	130
4.6.3 移位型计数器	132
4.7 半导体存储器	138
4.7.1 RAM 及非易失性存储器	138
4.7.2 半导体存储器的基本结构及访问	139
4.7.3 基于半导体存储器的组合逻辑电路设计	143
习题与思考题	145
第5章 可编程逻辑器件原理及典型产品	149
5.1 可编程逻辑器件概述	149

5.1.1	可编程逻辑器件的特点及可编程的核心原理	149
5.1.2	可编程逻辑器件的发展历程及分类	151
5.1.3	PLD 的主要厂商	152
5.1.4	PLD 的电路符号表示	152
5.2	PLD 的结构及工作原理	153
5.2.1	从 PROM 到 PLA	153
5.2.2	PAL 经 GAL 到乘积项结构 CPLD	155
5.2.3	基于查找表的 PLD 的工作原理简介	156
5.3	Altera 公司的 PLD 产品及开发	157
5.3.1	Altera 公司 PLD 产品的编程与配置	157
5.3.2	Altera 公司的 PLD 器件及应用基础	160
	习题与思考题	167
第 6 章	Verilog HDL 数字系统设计基础	168
6.1	基于硬件描述语言进行数字系统设计概述	168
6.2	Verilog HDL 的模块结构	169
6.3	Quartus II 的 Verilog HDL 设计环境	174
6.4	Verilog HDL 的三种建模方式	175
6.4.1	结构化描述方式	176
6.4.2	数据流描述方式	177
6.4.3	行为描述方式	179
6.4.4	过程赋值语句	184
6.5	典型组合逻辑电路的 Verilog HDL 描述举例	185
6.5.1	数据选择器设计	185
6.5.2	74138 译码器设计	186
6.5.3	数码管显示译码器设计	187
6.5.4	优先编码器	189
6.5.5	利用任务和函数语句对组合逻辑电路进行结构化描述	189
6.6	时序逻辑电路的 Verilog HDL 描述与设计	192
6.6.1	D 触发器的 Verilog HDL 描述	192
6.6.2	D 锁存器的 Verilog HDL 描述	195
6.7	基于 Verilog HDL 的计数器设计	197
6.7.1	基于 Verilog HDL 进行通用计数器设计	197
6.7.2	基于计数器的 PWM 波形发生器设计	199
6.8	基于 Verilog HDL 的移位寄存器设计	200
6.8.1	8 位双向移位寄存器的 Verilog HDL 描述	200
6.8.2	使用移位操作符设计移位寄存器	201
6.8.3	带两级锁存的串入并出移位寄存器 74595 的描述	202
6.8.4	移位型计数器的设计	203
6.9	Verilog HDL 的循环语句及应用	203

6.9.1	for 语句用法	204
6.9.2	repeat 语句用法	204
6.9.3	while 语句用法	205
6.9.4	Verilog HDL 循环语句应用要点	206
6.10	双向端口与存储器设计	206
6.10.1	8 位双向总线驱动器设计	207
6.10.2	存储器设计	207
	习题与思考题	211
第 7 章	Verilog HDL 有限状态机及应用	214
7.1	有限状态机及状态编码	214
7.1.1	有限状态机	214
7.1.2	状态编码	215
7.2	状态机安全设计	216
7.3	基于 Verilog HDL 的 FSM 设计	217
7.3.1	Verilog HDL 有限状态机常用语法元素	217
7.3.2	有限状态机的 Verilog HDL 描述	219
7.4	状态机图形化设计方法	231
	习题与思考题	234
第 8 章	D/A 与 A/D 转换器及其应用	236
8.1	D/A 与 A/D 转换器概述	236
8.2	D/A 转换器原理	237
8.2.1	权电阻网络 D/A 变换器原理	237
8.2.2	模拟开关的原理及应用	238
8.2.3	R-2R T 型电阻网络 D/A 转换器	239
8.2.4	电流输出型 D/A 转换器	242
8.2.5	D/A 转换器的主要技术指标及选型依据	243
8.2.6	基于 TL431 的基准电压源设计	244
8.3	DAC8032 及其应用	245
8.3.1	D/A 转换器芯片——DAC0832	245
8.3.2	DAC0832 的应用	247
8.4	A/D 转换器原理	248
8.4.1	并联比较型 A/D 转换器	249
8.4.2	计数型 A/D 转换器	249
8.4.3	逐次比较型 A/D 转换器	250
8.4.4	双积分型 A/D 转换器	252
8.4.5	A/D 转换器的主要性能指标	253
8.5	逐次比较型 A/D 转换器——ADC0809	253
8.5.1	ADC0809 芯片简介	253
8.5.2	ADC0809 的接口时序及状态机读写	255

习题与思考题	257
第9章 波形变换与产生电路	259
9.1 脉冲发生器与555集成电路	259
9.1.1 脉冲发生器	259
9.1.2 555集成电路的电路结构与功能	259
9.2 单稳态触发器	261
9.2.1 用CMOS门电路组成的微分型单稳态触发器	261
9.2.2 用555集成电路组成的单稳态触发器	263
9.2.3 单稳态触发器的定时应用	264
9.3 斯密特触发器	264
9.3.1 用门电路组成的斯密特触发器	265
9.3.2 用555集成电路组成的斯密特触发器	266
9.3.3 斯密特触发器的应用	267
9.4 多谐振荡器	268
9.4.1 用门电路组成的多谐振荡器	268
9.4.2 用斯密特触发器构成波形产生电路	269
9.4.3 用555集成电路组成的多谐振荡器	270
9.4.4 CMOS石英体振荡器	272
9.5 DDS波形发生原理及正弦波信号发生器设计	272
9.5.1 DDS工作原理	272
9.5.2 定制DDS所需的MegaFunction模块	273
9.5.3 顶层设计	282
9.5.4 Verilog HDL信号发生器设计	284
习题与思考题	286
附录A CMOS和TTL逻辑门电路的技术参数	289
附录B 74系列门电路速查表	290
附录C 可综合Verilog HDL语法速查表	293
附录D 常用逻辑符号对照表	296
参考文献	297

第1章 数字电子系统分析与设计基础

随着现代电子技术的发展,数字电路的发展与模拟电路一样经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路等几个时代。但是,数字电子技术的发展比模拟电子技术的发展具有更快的速度。

本章首先介绍了数字信号与数字电路的概念、几种常用数制的表示及转换、采用二进制数补码形式进行加减法运算方法;然后讨论了逻辑代数的基本定义、逻辑函数的代数法化简和卡诺图化简法;之后介绍了数字系统中常用的几种编码方式及其应用;最后简述了数字系统设计和EDA技术。

1.1 数字信号与数字电路

1.1.1 模拟信号与数字信号

自然界中存在各种各样的物理量,如温度、湿度、压力、速度、电压等。这些物理量随着时间变化的规律都可以看成是时间的函数,把表示承载不同信息物理量的时间函数称为信号。从时间的连续性角度可以把信号分为两类:模拟信号和数字信号。其中,若物理量的变化在时间上和数值上都是连续的,则称为模拟量,表示模拟量的信号称为模拟信号,如图1.1(a)所示。例如室内的温度、湿度、光强、气压等都是模拟信号;再如正弦信号和锯齿波信号等。

另一方面,若物理量的变化在时间和数值上都是离散的,即物理量在时间上和数值上都不连续,或者说它们只在一些离散的瞬间出现,而且在数值上是不连续的整数,这类物理量称为数字量,表示数字量的信号称为数字信号,如图1.1(b)所示。例如,采用温度计测量某环境温度的变化,要求自零点开始每0.5h读取数据1次,并且读取数据弃

小数取整。这样记录的温度数据在时间上和数值上都是离散的,即不连续,是数字信号,温度以 1°C 为单位增加和减少。

1.1.2 数字电路与模拟电路的区别及联系

电子技术中讨论的信号都是电信号,非电信号要经过传感器转换为电信号才能应用电子技术展开分析与设计。并把处理模拟电信号的电子电路称为模拟电路,而处理数字电信号的电子电路称为数字电路。数字电路主要研究电压信号。

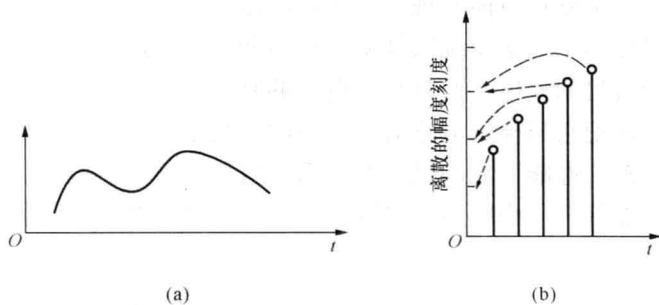


图1.1 模拟信号和数字信号示例

(a) 模拟信号示例; (b) 数字信号示例

模拟电路主要包括信号放大、功率放大、模拟有源滤波、电源稳压、模拟信号产生电路等。在实际的电子设备当中主要出现在前端传感器和模拟/数字转换器之间,起到阻抗匹配、信号调理、放大、滤波的作用;以及后端的数字/模拟转换器和执行器(如扬声器)之间,起到功率放大等作用。模拟电路的分析与设计将在模拟电子技术课程中学习。

数字电路是本书的主要内容,包括组合逻辑电路(编码器、译码器、数据选择器等)和时序逻辑电路(计数器、寄存器、脉冲产生与整形电路等),其处理的直接对象就是数字信号。数字电路在现代电子设备中应用非常广泛,例如手机、MP4、计算机、数码相机、数字电视等主要部分都属于数字电路。数字电路负责信号的数字运算、逻辑处理、数字滤波、波形产生、数据存储等功能,基于数字电路的各类计算机是智能设备的核心。

数字电路与模拟电路相比有以下优点。

(1) 数字电路是幅度离散的,且只有两个逻辑状态。如果用高电平表示逻辑“1”,而用低电平表示逻辑“0”,则称这种表示方法为正逻辑;反之,用低电平表示逻辑“1”,用高电平表示逻辑“0”,这种表示方法为负逻辑,本书中一律采用正逻辑。以 5V 表示高电平为例,在临近 5V 的较大范围内都表示为高电平;而在临近 0V 的较大范围内都表示为低电平。因此,数字电路相比模拟电路抗干扰性能高,且稳定。

(2) 数字运算可重复性好、精度高。16 位宽的逻辑电平所能表示数的精度就已达 $1/2^{16} \approx 1.5 \times 10^{-5}$,而模拟电路的精度很难超过 10^{-3} 。

(3) 数字电路结构简单,便于大规模集成,成本低,速度快。

(4) 可以通过编程改变芯片的逻辑功能,便于采用计算机辅助设计。比如利用本书第 6 章所讲的硬件描述语言编写代码设计可编程逻辑器件的逻辑功能,达到设计数字系统的目的。即具有可自定制特性。

虽然数字电路在现代电子设备中处于核心地位,可以说是电子系统的大脑和神经中枢。但是模拟电路所能实现的一些功能也是数字器件无法完成的,比如放大、阻抗匹配等,模拟电路相当于电子系统的耳朵、眼睛和手。所以模拟电路和数字电路是相辅相成且相互配合的一个有机的整体。而且数字电路的基本单元——门电路,分析其工作原理、输入输出特性时还应该把它当模拟电路对待。因此,数字电子系统离不开模拟技术,一个具有操作方便、功能完善、性能可靠的模拟电子系统也离不开数字电路。将数字电路和模拟电路相关联的两个重要部件——模拟/数字转换器和数字/模拟转换器,将在本书的第 8 章进行详细的介绍。

1.2 数制及转换

数制又称“计数制”,是指用一组固定的数码和一套统一的规则表示数值的方法。人们通常利用进位的方法来进行计数,简称进位制,在进位制中,常用“基数”来区别不同的数制。而某进位制的基数就是表示该进位制所用字符或数码的个数。如用 0~9 共 10 个数码表示数的大小称十进制数;用 0~1 两个数码表示数的大小称为二进制数;用 0~9、a、b、c、d、e 和 f 十六个数码表示数的大小称为十六进制数;类似地还有八进制数等。二进制、十进制、八进制和十六进制分别用字母 B、D、O 和 H 表示。由于实际工程中较少使用八进制,因此,本书没有讲述八进制的相关知识。

1.2.1 十进制

十进制有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 共十个符号，称为数码，其基数为 10，计数规则为“逢十进一”。一个十进制数可以用若干个数码组成，每个数码和该数码所在的位置决定了该数的大小，即每个数码的位置载有该数大小的一个特定值，称为“位权”。每个位置的“位权”用“基数”的幂次来确定。例如，十进制数 321.45 可以表示成下列多项式

$$(321.45)_D = 3 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 4 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

此式称为按位权展开式。

任意一个具有 n 位整数和 m 位小数的十进制数按权展开式可以表示为

$$\begin{aligned} (N)_D &= d_{n-1}10^{n-1} + d_{n-2}10^{n-2} + \cdots + d_110^1 + d_010^0 + d_{-1}10^{-1} + d_{-2}10^{-2} \\ &+ \cdots + d_{-m}10^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} d_i 10^i \end{aligned} \quad (1.1)$$

式中： 10^i 表示各位的权值。

1.2.2 二进制

在进位计数制中二进制最简单，它只包括“1”和“0”两个数码，与数字电路的高低电平一一对应，也和电子器件的开关状态相对应。因此，二进制相关知识是数字系统分析与设计的基础。二进制的基数为 2，计数规则为“逢二进一”。二进制数也采用位置计数法，每个位置的位权是 2 的若干次幂。

例如：二进制数 101.01 可以表示成下列多项式

$$\begin{aligned} (101.01)_2 &= 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\ &= 4 + 0 + 1 + 0 + 0.25 = (5.25)_D \end{aligned}$$

具有 n 位整数和 m 位小数的二进制数的一般形式为

$$\begin{aligned} (N)_B &= b_{n-1}2^{n-1} + b_{n-2}2^{n-2} + \cdots + b_12^1 + b_02^0 + b_{-1}2^{-1} + b_{-2}2^{-2} \\ &+ \cdots + b_{-m}2^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} b_i 2^i \end{aligned} \quad (1.2)$$

二进制数与数字系统中的各节点物理状态相对应，是数字电路分析的数学基础。但是，其缺点是用其表示相同一个数比采用十进制表示位数多，尤其当表示数较大时更为明显。

1.2.3 十六进制

上面提到若用二进制表示一个比较大的数时，位数比较长且不易读写，因此在数字系统设计时，经常将其改为 2^n 进制来表达，其中最常用的是十六进制（即 2^4 ）。十六进制数的基数为 16，由 16 个不同的数码组成，计数规则是“逢十六进一”。十六进制数用 16 个不同的数码表示：除了 0~9 这十个数字外，还用字母 A、B、C、D、E、F 或 a、b、c、d、e、f 来分别表示 10、11、12、13、14、15。例如：十六进制数 8C2.E 按位展开为

$$\begin{aligned} (8C2.E)_H &= 8 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 2 \times 16^0 + 14 \times 16^{-1} \\ &= 2048 + 192 + 2 + 0.875 = (2242.875)_D \end{aligned}$$

类似地，任意一个十六进制数可以写成按位权展开式

$$(N)_H = \sum_{i=-m}^{n-1} h_i 16^i \quad (1.3)$$

1.2.4 不同进制之间的相互转换

1. 二进制数和十六进制数之间转换

由于 4 位二进制数恰好有 16 ($=2^4$) 个状态，而把 4 位二进制数看成一个整体时，它的

进位输出正好是逢十六进一，即 4 位二进制数对应 1 位十六进制数，见表 1.1。这是二进制数和十六进制数之间转换的理论前提和具体方法。

表 1.1 4 位二进制数与 1 位十六进制数对照表

十六进制数	二进制数	十六进制数	二进制数
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	A	1010
3	0011	B	1011
4	0100	C	1100
5	0101	D	1101
6	0110	E	1110
7	0111	F	1111

(1) 二 - 十六进制转换。将二进制数转换成等值的十六进制数称为二 - 十六进制转换。具体方法是：将二进制数从小数点向左向右每 4 个二进制位分为一组，并用等值的十六进制数代替，就可以得到相应的十六进制数。实际应用中，十六进制通常作为二进制的简写来缩短二进制数的长度。尤其是在计算机技术中更是如此。

【例 1.1】 将二进制数 $(110101101.101011)_B$ 转换成十六进制数。

解 将该二进制数从小数点向左向右每 4 位分为一组得

$$\begin{aligned}
 & (110101101.101011)_B \\
 & = \underbrace{1101}_{\text{D}} \underbrace{0110}_{\text{A}} \underbrace{1101}_{\text{D}} . \underbrace{1010}_{\text{A}} \underbrace{1100}_{\text{C}} \\
 & = (1AD.AC)_H
 \end{aligned}$$

(2) 十六 - 二进制转换。把十六进制转换成等值的二进制数称为十六 - 二进制转换。转换时，不论整数部分还是小数部分，把每一位十六进制数都用相应的 4 位二进制数代替，即可得到等值的二进制数。

【例 1.2】 将十六进制数 $(FE2.B1D)_H$ 转换成二进制数。

解 把 $(FE2.B1D)_H$ 的每位用相应的 4 位二进制数代替得

$$\begin{aligned}
 & (FE2.B1D)_H \\
 & = \underbrace{F}_{1111} \underbrace{E}_{1110} \underbrace{2}_{0010} . \underbrace{B}_{1011} \underbrace{1}_{0001} \underbrace{D}_{1101} \\
 & = (111111100010.101100011101)_B
 \end{aligned}$$

2. 二进制数和十六进制数转换成十进制数

人们习惯于采用十进制数，将二进制数和十六进制数转换为等值的十进制数可便于观察大小。转换时只需将被转换的数按照相应的位权展开，再按照十进制数运算规则运算，即可得到相应的十进制数。其实，在讲述二进制和十六进制时已经给出转换方法，这里再举两个例子。

【例 1.3】 将二进制数 $(1010.11)_2$ 转换成十进制数。

解 $(1010.11)_B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = 8 + 2 + 0.5 + 0.25 = (10.25)_D$

【例 1.4】 将十六进制数 $(1BC.A)_H$ 转换成十进制数。

解 $(1BC.A)_H = 1 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 12 \times 16^0 + 10 \times 16^{-1} = 256 + 176 + 12 + 0.0625 = (444.0625)_D$

3. 十进制数转换成二进制和十六进制数

十进制数转换成二进制数和十六进制数，需将十进制数的整数部分和小数部分分别进行转换，然后将它们合并起来。

(1) 十进制整数转换成二进制数或十六进制数。将被转换的十进制整数采用逐次除以基数 2 (或 16) 取余数的方法，步骤如下。

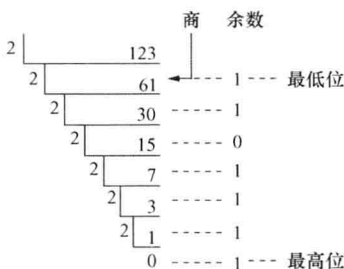
1) 将给定的十进制数除以基数 2 (或 16)，余数作为二进制 (或十六进制) 数的最低位。

2) 把第 1) 步的商再除以基数 2 (或 16)，余数作为次低位。

3) 重复第 2) 步，记下余数，直至商为 0，最后的余数作为对应进制数的最高位。

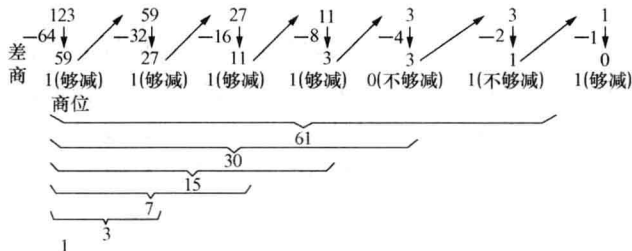
【例 1.5】 将十进制数 $(123)_D$ 转换成二进制数。

解 因为二进制数基数为 2，所以采用逐次除 2 取余法，即



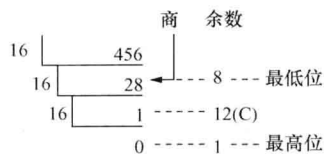
所以， $(123)_D = (1111011)_B$ 。

其实，一个优秀的电子工程师对于二进制位权是熟记在心的。 n 位二进制数 $(b_{n-1} \cdots b_i \cdots b_7 b_6 b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0)$ 的位权依次为 2^{n-1} 、 $\cdots$ 、 2^i 、 $\cdots$ 、128、64、32、16、8、4、2 和 1。其第 i 位的位权值是 $i+1$ 位二进制数所表示数的范围 (2^{i+1}) 的一半，这就是为什么要逐次除 2 取余。在十进制整数转换成二进制数过程中其实质就是该十进制整数依次与各个权值相减，够减则作差用于后续判断，且该位为 1，否则该位为 0，判断下一位，直至差为 0。例如



【例 1.6】 将十进制数 $(456)_D$ 转换成十六进制数。

解 因为十六进制数基数为 16，所以采用逐次除 16 取余法，即



所以, $(456)_D = (1C8)_H$ 。

(2) 十进制纯小数转换成二进制数或十六进制数。将十进制纯小数部分转换成等值的二进制(或十六进制)数时,采用将小数部分逐次乘以基数 2(或 16),去除整数部分后的小数继续乘以基数,直到最后乘积无小数部分或者达到一定的精度为止。然后取乘积的整数部分作为二(或十六)进制数的各有关位。

注意,转换过程中可能发生小数部分永不为 0 的情况,这时只能根据精度要求的位数决定转换后小数的位数。

【例 1.7】 将十进制数 $(0.875)_D$ 转换成二进制数。

解 因为二进制数基数为 2,所以采用逐次乘 2 取整法,即

0.875	
× 2	整数部分
1.750	----- 1 -- 作为小数
0.750	最高位
× 2	
1.500	----- 1
0.500	
× 2	
1.0	----- 1

所以, $(0.875)_D = (0.111)_B$ 。

【例 1.8】 将十进制数 $(0.90625)_D$ 转换成十六进制数。

解 十六进制数基数为 16,所以采用逐次乘 16 取整法,即

0.90625	
× 16	整数部分
14.5	----- E -- 作为小数
0.5	最高位
× 16	
8.0	----- 8

所以, $(0.90625)_D = (0.E8)_H$ 。

1.3 逻辑运算与逻辑代数

逻辑代数是分析和设计数字电路的基本数学工具。逻辑代数是按一定逻辑规律进行逻辑运算的代数,又称布尔代数。逻辑代数中进行逻辑运算的变量称为逻辑变量,和普通代数变量一样,也用字母表示。在二值逻辑中,只有两种对应的逻辑状态,每个逻辑变量的取值只有“0”或者“1”两种。与数字电路及应用相对应,这里的“0”和“1”不代表数量的大小,只表示两种不同的逻辑状态,如电平的高低、开关的通断、事件的真假等。

1.3.1 逻辑运算及其表示方法

逻辑代数中的基本逻辑运算有与(AND)、或(OR)、非(NOT)三种。下面再分别讨论这三种基本逻辑运算基础上讨论复合逻辑运算。